

鉄道車両用定置型状態監視システム

城取 岳夫*

Wayside Monitoring Systems for Railway Vehicles

Takeo SHIROTORI

Wayside monitoring systems for railway vehicles have the ability to collect information about the condition of their running gear. Since these wayside monitoring systems are capable of detecting and identifying bogies with poor performance, they help railway operators to conduct effective maintenance and to enhance the safety of railway vehicles. For this reason, a wide variety of wayside monitoring systems have been developed and used in practical fields. The aim of this article is to summarize their history and the technical trends of wayside monitoring systems in order to contribute to researchers who are developing those systems and railway company operators who are in a position to decide to introduce them.

キーワード：状態監視，鉄道車両，定置型，台車

1. はじめに

安全性や乗心地の維持のために鉄道車両の状態監視する方法には、センサを車両に取り付けて異常を監視する方法とセンサを地上に設け通過する車両の異常を監視する方法がある。センサを車両に取り付ける方法は、脱線など即座に対処する必要がある異常を検知できる反面、車両の数だけセンサが必要になることや常に振動に暴露されているため配線を含めたシステムの耐振動性が必要になる。センサを地上（定置）に設ける方法は、車両を常に監視し続けることはできないが1つのシステムで多くの車両を監視することができ、比較的振動が少ない環境であるため、耐振動性の面でより有利である。

近年車両にセンサを取り付ける状態監視の研究が盛んであり、技術動向調査¹⁾も行われているので、本稿では他方の定置型の車両状態監視について解説する。最初にこれまでの研究開発を概観したうえで、現在の技術レベルを把握するために最近の研究開発を数例詳細に取り上げる。最後に今後進めるべき課題を考察する。

2. 定置型車両状態監視システムの概観

2.1 旧国鉄の鉄道技術研究所の研究開発

1970年代から1990年代にかけ旧国鉄の鉄道技術研究所では精力的に定置型車両状態監視システムの研究開発が行われた。

1972年にレールに設置した歪ゲージによる貨車の偏積測定装置の開発や赤外線カメラによる軸箱表面温度の

自動検知が試みられた²⁾。その後、光学式のフランジ異常摩耗検知や振動による車輪フラット検知³⁾、あるいは音響による車輪フラット検知、列車番号の読み取りの自動化⁴⁾、車輪径やバグゲージ測定、パンタグラフのすり板摩耗測定や押し上げ力測定⁵⁾のための装置が研究開発された。車両走行速度5km/hで、パンタグラフのすり板摩耗は0.5mm、押し上げ力は約1N、車輪のフランジ摩耗測定は0.5mmの精度が実現された⁶⁾。1970年代中ごろ寒冷地で発生していた温度変化によるタイヤの割損が問題になり、先駆的な超音波表面波によるタイヤ割損検知が試みられた^{5) 6)}。これにより、外見上損傷の無い踏面内部に対しても割損検知が可能になった。1980年になると、軸箱表面温度測定が車両走行速度200km/h以上で可能になった⁷⁾。各検知項目は年々改良が加えられ機能が向上された。一覧を表1に示す。

2.2 1980年以降の国内の研究開発

1980年代後半から他の鉄道事業者でも振動加速度計をレールに設置したフラット検知装置が開発された。これにより踏面異常による騒音の調査が省力化され、効率的な転削も可能になった。さらに検知精度や利便性が向上されて現在のシステムに至っており、近年のシステムでは無線通信やインターネットを活用してリアルタイムで集中管理することが可能になっている⁸⁾。また、レールに歪ゲージや加速度計を設置するのではなく、車両通過時に構造物から放射される音を構造物下に設置したマイクロホンで収録する装置^{9) 10)}や構造物に設置した振動計で構造物振動を収録する装置¹¹⁾が開発されている。これらの装置は、測定対象車両のモーター音や車体空力音の影響を抑えることにより検知データの信頼性を上げ

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室

表 1 旧国鉄 鉄道技術研究所の研究開発

年代	検知対象
1972年	<ul style="list-style-type: none"> ・貨車の偏積 ・軸箱表面温度
1974年	<ul style="list-style-type: none"> ・フランジ摩耗 ・車輪フラット(振動式) ・貨車の偏積(45km/h 対応) ・車輪フラット(音響式) ・列車番号読み取り
1975年 全体構想	<ul style="list-style-type: none"> ・貨車の偏積(75km/h 対応, 移動式) ・車輪フラット(振動式, 音響式) ・フランジ摩耗 ・タイヤ割損 ・軸箱表面温度 ・パンタグラフのすり板摩耗, 押上げ力 ・車輪径, バッグゲージ
1976年 試作試験	<ul style="list-style-type: none"> ・貨車の偏積(75km/h 対応, 移動式) ・車輪フラット(振動式, 音響式) ・蛇行動(レール左右変位式) ・パンタグラフのすり板摩耗, 押上げ力・フランジ摩耗 ・タイヤ割損 ・車輪径, バッグゲージ
1980年 現車試験	<ul style="list-style-type: none"> ・バッグゲージ(高精度化) ・軸箱表面温度(軸箱内温度との比較) ・車輪フラット(加速度計式と歪式の機能比較) ・フランジ摩耗 ・パンタグラフの押上げ力

られるほか、営業運転時間中であっても設置したマイクロホンや振動計のメンテナンスができる利点を持つ。これらの装置は車輪踏面のフラットのほか、円周方向の偏摩耗(多角形摩耗)を対象としている。多角形摩耗は、乗心地の悪化や軌道構造物音による騒音の原因となる。

振動を応用するフラット・剥離検知装置では、車輪踏面や車輪フランジの摩耗量の特定が難しいため、カメラを用いて車輪の画像を撮影する装置が利用される。形状を数値化するだけでなく、この画像を処理して車輪踏面のフランジ厚さ、フランジ高さ、車輪径を自動測定する装置が開発された¹²⁾。

鉄道車両は脱線しないことが安全上非常に重要である。このためレールに設置した歪ゲージにより輪重と横圧を測定し、通過した車両の脱線リスクを評価する方法が試みられたが、輪重と横圧の相互干渉などいくつかの課題が明らかになった¹³⁾。その後これらの課題が解決され、輪重と横圧の地上測定による台車の脱線に対する安全性の監視システムが実用化された¹⁴⁾。

軸箱温度検知に関して、太陽高度や雪など周辺環境の

対策だけでなく、ダイヤの乱れ等で検知器前に車両が停車した場合に起こる検知不良など実用上生じる不具合の対策が進んだ装置が開発された¹⁵⁾。

ブレーキシューや集電シューの摩耗量の状態把握・監視について、部品に水滴がついている場合であっても複数のフィルタにより影響を軽減して安定したセンシングを高精度で実現した例が報告されている¹⁶⁾。

軸箱温度や車輪形状、制輪子摩耗など複数の監視を連続的に自動で行うメンテナンスシステムが提案されており、特に漏油検査では付着している液体が水であるのか油であるのか判定するために紫外光処理画像を使用する手法が提案されている¹⁷⁾。

パンタグラフの状態監視については、約25km/hで走行している車両のパンタグラフの状態を自動判定する装置が開発され¹⁸⁾、他に舟体の損傷も自動判定する装置も報告されている¹⁹⁾。また在来線のすり板段付摩耗、パンタグラフの揚力異常およびパンタグラフの動特性異常を電車線に取り付けた加速度計の情報から検知する試みがあり、センサ部を無線化して非加圧部に判定装置を置くことができるより安全なシステムが提案されている²⁰⁾。

2.3 海外の定置型車両状態監視システム

海外の定置型車両状態監視についても、車輪フラット検知や車輪プロファイルの計測、加熱軸受の検知など国内の定置型車両状態監視と同様の項目を監視する装置が開発されている。

近年、中国では定置型車両状態監視システムを積極的に導入している。踏面損傷を検知する装置が営業線で運用されるようになり、システムの紹介や検知実績による装置導入の効果が報告されている²¹⁾。特に車輪踏面の異常を検知する装置と軸受の異常を検知する装置の情報から両者の関係を導いた研究があり、これによると踏面損傷が検知された3ヶ月程後に軸受損傷が検知されることが示された²²⁾。また、音響による軸受異常の検知装置²³⁾や超音波表面波によるタイヤ割損検知装置²⁴⁾、赤外線カメラによる軸箱表面温度の自動検知装置²⁵⁾が報告されている。

こうした定置型車両状態監視システムについては、各国で実用期に入り複数のメーカーが装置を作るようになった。車輪踏面の形状測定について、対応できる車両走行速度や寒冷地仕様の可能性、装置を設置するために列車を止める時間等により5社の製品を比較し、特に雪の影響による信頼性に関してケーススタディが行われた²⁶⁾。

一方で、国内では見られない監視項目が、蛇行動や曲線旋回性不良、ミスアライメント台車の検知である。

蛇行動検知については、レールに設置した歪ゲージにより輪軸横圧を測定することで蛇行動を起こしている台車を検知する装置が開発されている。蛇行動を起こし

ている台車の発見は、安全性の向上はもとより、軌道摩擦の低減にも貢献する。車両走行速度約 50km/h から約 300km/h までの測定が可能である²⁷⁾。

曲線旋回性不良の検知については、図 1 に示すように S 字曲線において 2 つの曲線と曲線間の直線で輪重と横圧を測定し、曲線旋回性を測定する装置が開発されている。軌道にかかる応力の緩和を検討する際に、この装置が信頼性のある情報を提供する²⁸⁾。

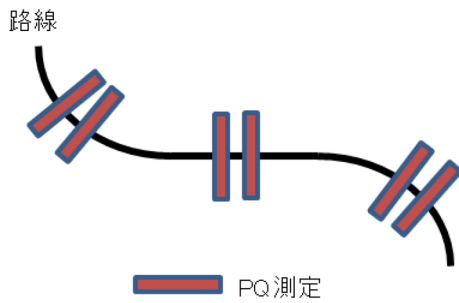


図 1 曲線旋回性不良検知装置の概念図

台車のミスアライメントの検知については、レーザーによりアタック角やレール中心に対する輪軸中心のずれ量を測定し、2 輪軸の非平行度やレール中心に対する台車中心のずれ量を算出する装置が開発されている。車輪踏面の摩擦を減らし車輪の寿命を延ばし、レールの摩擦を減らしレールの削正回数を減らすことができるとされている。車両走行速度 300km/h まで測定が可能である²⁹⁾。

表 2 に各台車性能の検知システムの検知対象と測定対象をまとめた。

表 2 台車性能の検知システム

検知対象	測定対象	文献
・蛇行動と乗り上がり脱線の危険性	歪ゲージによる輪重・横圧	文献27
・摩滅した摩擦くさび ・破損した支持ばね ・曲がった車体	輪重・横圧	文献28
・蛇行動 ・台車ミスアライメント	光学式による輪軸のアタック角と走行位置	文献29

状態監視のために可視光カメラや画像処理技術を使うことが鉄道分野でも試みられている。これらはマシン・ビジョン・テクノロジーと呼ばれる技術である。

例えば、大軸重貨車のフレーム欠陥検査への試みが報告されている。センター・シル（中梁）の欠陥が米国では毎年 100 件近く見つかる。このため、パノラマ画像により大軸重貨車を床下から撮影し下部フレームの損傷や欠陥を検知することが試みられた。開発した画像収集システムと検査アルゴリズムは、有効性、効率、車両検査の客観性の 3 点に優れ、自動検査の可能性を示した³⁰⁾。

3. 最近の研究開発

以下では、最近の技術レベルを把握するために、4 つの例を詳細に紹介する。

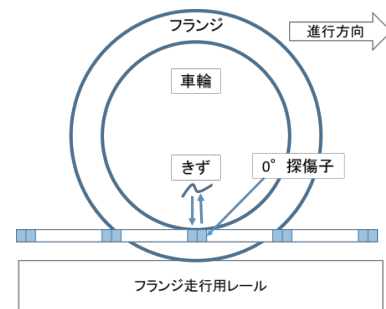
3.1 自動クラック車輪監視システムの検知性能³¹⁾

Transportation Technology Center, Inc. (TTCI) がある米国には 160 万両の貨車と 2 万 6 千両の機関車があり、これらの健全性を保証するために定置型車両状態監視システムへの関心が高い。

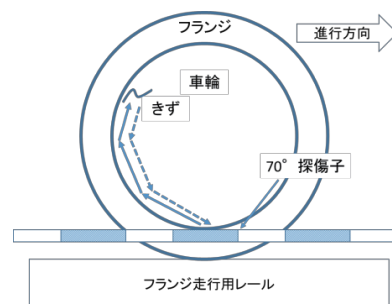
TTCI は、Tycho 社の超音波式 Automatic Cracked Wheel Detector System (ACWDS) を評価した。

この装置では、車輪をフランジで走行させ、ばねで支持した超音波探傷子群を車輪踏面が踏むことにより探傷子と踏面が接触し、踏面が検査される。超音波が空气中で減衰しないように探傷子と踏面の間は水浴される。720 個の 2.5MHz の超音波探傷子が設置されており、うち 480 個は照射角 0° の探傷子、残り 240 個は照射角 70° の探傷子（図 2）である。

TTCI は、自然発生した傷のある車輪を使い、車両走行速度 8km/h から 24km/h で ACWDS を評価した。試験の結果、検知能力の車両走行速度に対する依存性は無かった。いくつかのタイプの欠陥は 100% 検知できた一方で、許容範囲外のシェリング傷や踏面のビルドアップに対して警告を発することができなかった。そこで、Tycho 社はカメラによる画像認識技術も導入しこれらを検知しようとしており、開発は今も進められている。



a) 照射角 0° 探傷の概念図



b) 照射角 70° 探傷の概念図

図 2 車輪監視システムの概念図

3.2 全自動台車部品監視システムの評価³²⁾

TTCIは、全自動台車部品監視システムの試験と評価を2014年に行った。この装置は、軸端キャップボルトの遺失検知、ばねの欠陥検知、軸箱体と軸箱守間の隙間計測に利用できるシステムである。システムは、KLD Labs Inc.社から提供され、カメラとライト、制御装置、台車の状態を解析し報告するソフトウェアから構成される。システムは車両の両進行方向に対応し、かつ車両走行速度72.4km/hまで対応する。FASTと呼ばれる試験線で、システムは軌道の左右の両側に設置された。既知の欠陥を持つ試験車両を使いこのシステムを評価した。カメラとライトは、ほぼ軸端の高さに設置され、走行試験は夜間に行われた。

軸端キャップボルトの遺失検知に関して、正常状態の画像と比較することにより、合計1,404個の軸端キャップボルトが評価され、遺失ボルトの特定に17回成功し、12回失敗した。失敗した12回の内11回は貨車の車体に付く梯子やその陰がボルトの形状と重なっていた。残り1回では梯子の陰が重なっていなかった。KLD社は検知できなかったこの1ケースについて調査中である。

次に、正常な軸端キャップを異常と誤検知することの評価が行われた。67回の走行による58,230個の軸端キャップで評価したところ、システムは88個の遺失ボルトを検出したと誤検知した。これは擬陽性検知率が0.15%であることを意味する。誤検知の理由は、梯子の陰になった場合と穴があるように見える形状のボルトが付いていた場合の2つの場合であった。

また、図3に示す軸箱体と軸箱守間の隙間計測に関してこのシステムの分解能が調査され、5/100mm以下であったことが報告されている。

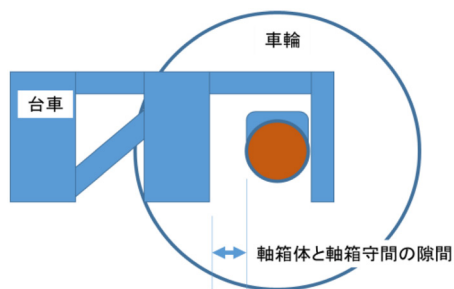


図3 軸箱体と軸箱守間の隙間

3.3 光ケーブル屈折率変調センシング³³⁾

光ケーブルを軌道に沿って設置する新しいタイプの定置型車両状態監視システムが試みられている。光ケーブルに多波長の光信号を入射すると、音圧によって光ケーブルに応力がかかっている部分から、特定の波長の光のみが反射され入射口に返ってくる。返ってくる光の波長が音の大きさに比例するので波長を調べれば音の大きさ

がわかる。この原理を使ったセンシングはFiber Bragg Grating(FBG)センシングと呼ばれる。米国では、車両の欠陥検知や軌道健全性監視、列車位置トラッキングのための光ケーブルを用いた分散型音響センシングシステムの実現が期待されている(図4)。

このシステムは非常に鋭敏なので、深さ2.5mの地下に埋められた光ケーブルがその上を歩く人の足音を検知できる。TTCIのPueblo実験線では、ほぼ20kmにわたり光ケーブルが埋設されており、隣接する2本の試験線双方を検知できる。

今後、このシステムで収集できる音により、車両機器の脱落による引きずりや空気配管の漏気、固着したブレーキ、軸受の異常、脱線した輪軸、軌道の不整などの検知を可能にすることを目標としている。

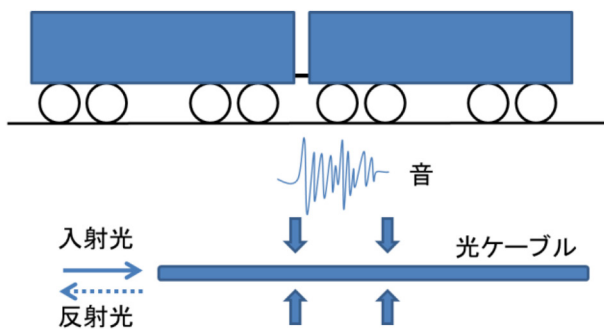


図4 光ケーブル屈折率変調センシングの概念図

3.4 カメラを使った振動解析^{34) 35)}

多くの定置型車両状態監視システムが存在する一方で、ばねやダンパなど台車の重要部品の機能や台車部品のガタツキを走行中に監視する装置は開発されていない。

そこで、筆者らはレール上に取り付けた厚さ5mm~10mm程度の鉄板やレールの継目を通過する際の台車の振動を地上に設置した高速度カメラから測定し、台車部品の固有振動周波数の変化から状態監視をする手法を開発した。システムは、高速度カメラ、撮影・解析PC、加振源により構成される(図5)。

鉄板を通過後の軸箱固有振動周波数の変化により軸はりゴムの剛性を診断、レールの継目通過後の排障器の反共振の変化により排障器のガタツキを検知する(図6)。

高速度カメラをレールから約2m離れたところに設置した場合、画像解析後の長さ分解能は1mm未満となる。現在、排障器のガタツキ検知は車両走行速度15km/hまで対応する。

非分解で診断ができるので近い将来営業車両の帰着検査などに応用する予定である。さらに監視対象を拡大するために開発を続けている。



図5 システム構成

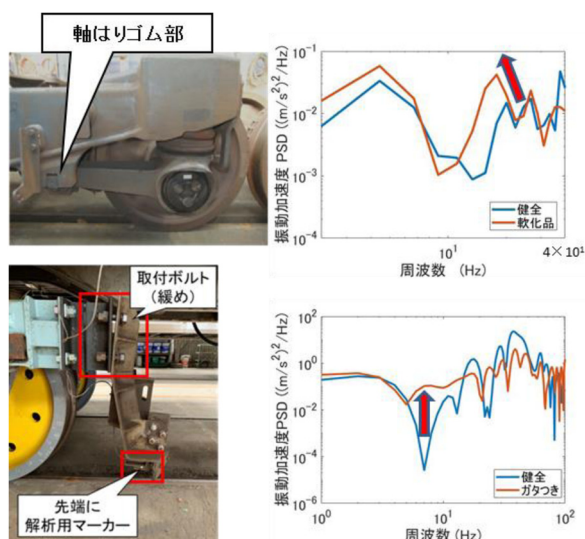


図6 軸はりゴム剛性と排障器のガタツキ検知

4. 今後進めるべき課題

ここまで、世界中で進む多くの定置型車両状態監視システムの開発事例を解説した。これらを踏まえ、今後進めるべき課題を考える。

4.1 余寿命の予測法の開発

定置型車両状態監視システムに関する多くの報告が存在するが、対象の台車部品の余寿命がどの程度存在するかにまで言及した報告は無かった。

鉄道事業者にとっては、直ちに車両を止める必要があるのか、1週間、あるいは1ヶ月その車両を使用し続けられるのかを明らかに出来ることは重要である。鉄道

事業者は何千両もの車両を保有し、このうちの多くの車両でメンテナンスが必要になっている中で、どの車両を最初にメンテナンスするべきかを決断しなければならない。このためには各不具合事象の余寿命を評価できなければならない。

余寿命を予測できるようにするには、時間や荷重条件により、台車部品がどのように劣化してゆくのかを明らかにする必要がある。この課題は複雑で、部品の劣化は部品製造時の品質のばらつきの問題と使用条件の問題があり、後者には車両の荷重条件、走行速度、走行線区の曲線の多さなどいくつかの条件がある。

多くの詳細なデータを比較的容易に収集し、蓄積していくことができる定置型車両状態監視システムは、台車部品の劣化過程を明らかにする上でも有効な手段である。

4.2 メンテナンス戦略の確立

検知性能だけが状態監視システムを使うか否かの基準ではない。例えば車輪踏面の欠陥検知を例にとると2つのメンテナンスの考え方がある。

1つ目の考え方は、在姿旋盤などで車輪踏面を頻繁に削る考え方である。踏面傷が小さいうちに削正するので傷が大きく成長しない。よって踏面傷の状態監視の必要性が小さい。

もう1つの考え方は、削正頻度を少なくし、踏面傷の状態監視を頻度高く行う考え方である。どちらの考え方を採用するのが良いかは、乗心地、沿線への騒音問題、保有車輪数などの条件により異なる。戦略を検討するには部品の摩耗、欠陥進展の定量的なデータがさらに必要で、こうした場面でも車両に多くのセンサを取り付ける必要がない定置型車両状態監視システムが貢献していくものと考えられる。

5. まとめ

定置型の車両状態監視について、研究開発の経緯を概観し、最近の研究開発を数例挙げ、最後に今後進めるべき課題を考察した。

日本では2060年に生産年齢人口が約半分に減る時代を迎える³⁶⁾。従って、鉄道事業の品質を今と同程度のレベルに維持するためには50%の省力化が必要になる。この課題のために技術開発が必要であるが、省力化の有効な技術となりうる状態監視に関しては、誤検知や余寿命の予測、メンテナンス戦略の確立などいくつかの課題がある。これらの課題を乗り越えるには、数多くのデータと検討を重ねる時間が必要で、将来に向けて今から始動することが重要である。

文 献

- 1) R W Ngigi, C Pislaru, A Ball, F Gu : Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics, 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering, Conference Series 364, pp.1-12, 2012, DOI:10.1088/1742-6596/364/1/012016.
- 2) 塩谷明男, 山崎恵三, 瀬間勝利, 前田哲夫 : 貨車到着検査 (FIIS) の自動化について, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 通号 9, pp.494-499, 1972
- 3) 村戸健一, 瀬間勝利, 塩谷明男, 和田覚太郎, 浅石孝志, 加藤政雄 : 列車到着検査 (FIIS) の自動化 (第 3 報その 2), 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 通号 11, pp.392-396, 1974
- 4) 村戸健一, 瀬間勝利, 前田哲夫, 塩谷明男, 中村正信, 島田昭一, 浅石孝志, 二宮康昌 : 列車到着検査 (FIIS) の自動化 (第 3 報その 1), 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 通号 11, pp.386-391, 1974
- 5) 村戸健一, 瀬間勝利, 石田義雄, 塩谷明男, 中村正信, 島田昭一, 和田覚太郎 : 車両自動検査情報システムの研究, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 通号 12, pp.408-412, 1975
- 6) 村戸健一, 丸山八雄, 石田義雄, 石川三智, 塩谷明男, 中村正信, 島田昭一, 和田覚太郎, 瀬間勝利, 馬場茂治 : 車両自動検査情報システムの研究 (第 2 報), 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 通号 13, pp.348-352, 1976
- 7) 村戸健一, 吉沢貞一, 前川守, 塩見征義, 塩谷明男, 和田覚太郎, 島田昭一, 服部恵夫, 関根朝次 : 走行車両の自動検出手法の開発, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 通号 17, pp.370-374, 1980
- 8) 渡邊直史, 山田純, 遠藤亮 : 『車輪踏面損傷状態監視システム』の実用化, R&M, Vol.12, No.4, 通巻 643, pp.17-22, 2004
- 9) 高橋亮一, 中村哲也, 麻生隆司, 中西正利 : 新幹線車輪踏面異常検知装置の開発, JREA, Vol.43, No.10, pp.27230-27232, 2000
- 10) 糸永宣昭, 八野英美 : 新幹線車輪状態把握システムの開発, R&M, Vol.17, No. 6, 通巻 705, pp.12-15, 2009
- 11) 杉田裕伸, 森智彦, 八野英美 : 新幹線車輪の摩耗度合い判定システムの開発, R&M, Vol.24, No.2, 通巻 785, pp.50-53, 2016
- 12) 森信昭, 山田勝也, 織田和則 : 車輪踏面管理装置の開発, R&M, Vol.7, No.11, 通巻 590, pp.18-21, 1999
- 13) 齊藤彰 : 軌道系脱線予知システムの研究, JREA, Vol.38, No.12, pp.23558-23562, 1995
- 14) 齋藤拓也, 中島正貴, 中里祐一, 清水忠, 鹿田敬司, 佐藤興志, 下川嘉之, 谷本益久 : 地上 PQ 測定による営業線データの解析結果報告, 第 17 回鉄道技術シンポジウム (J-RAIL), pp.333-336, 2010
- 15) 上村裕二, 仲田圭吾, 大庭拓也, 平野正敏 : 特集 新幹線軸箱温度検知装置の開発, JREA, Vol.56, No.5, pp.37714-37717, 2013
- 16) 日比修, 渡邊直史, 大森昭嗣 : HSST 車両摩耗状態監視システムの開発, R&M, Vol.14, No.8, 通巻 671, pp.35-38, 2006
- 17) 村田均 : 鉄道車両メンテナンスシステム, 東芝レビュー鉄道, Vol.55, No.9, pp.40-43, 2000
- 18) 大槻寧健, 香坂秀一, 中茂樹 : パンタグラフ自動監視装置の開発, JREA, Vol.42, No.7, pp.26266-26269, 1999
- 19) 近畿日本鉄道株式会社 : パンタグラフ監視装置, JREA, Vol.45, No.4, pp.28325, 2002
- 20) 小山達弥, 白田隆之, 池田充, 久家広嗣 : 電車線に設置したセンサによるパンタグラフすり板の段付き摩耗検知手法の開発, JREA, Vol.59, No.12, pp.40865-40868, 2002
- 21) Cheng Zhendong, Li Rose Cheng : Real-time Vehicle Performance Monitoring System of Wheel/Rail Contact Stress, 中国鉄道 Chinese Railways, No.4, 通巻 622, pp.99-102, 2014 (in Chinese).
- 22) Hu Wei : Analysis on Relationship between TADS Alarmed Axle Failure and TPDS Inspection Results, 中国鉄道 Chinese Railways, No.4, 通巻 586, pp.70-72, 2011 (in Chinese).
- 23) Li Hao et al : The EMU Tracksides Acoustic Detection System (TADS) Technology and its Application, 中国鉄道 Chinese Railways, No.3, 通号 645, pp.61-64, 2016 (in Chinese).
- 24) Chen Gang, Peng Chao Yong, Zhang Yu : An Upgrading Scheme of On-line Detection System for Wheel Fault of Existing EMUs, 中国鉄道 Chinese Railways, No.3, 通号 645, pp.31-35, 2016 (in Chinese).
- 25) Guo Xiaodong : Temperature Control System of Infrared Hotbox Detection Car, 中国鉄道 Chinese Railways, No.8, 通号 .578, pp.54-57, 2010 (in Chinese).
- 26) Matthias Asplund, Per Gustafsson, Thomas Nordmark, Matti Rantatalo, Mikael Palo, Stephen Mayowa Famurewa, Karina Wandt : Reliability and measurement accuracy of a condition monitoring system in an extreme climate: A case study of automatic laser scanning of wheel profiles, Rail and Rapid Transit, Vol.228, No.6, pp.695-704, 2014.
- 27) LBFoster, Hunting Truck Detector (HTD) : <https://www.lbfoster.com/perch/resources/salienthtd2018.pdf>. (参照日 : 2020 年 2 月 25 日)
- 28) IEM, Truck Performance Detector (TPD) : [http://www.iem.net/products?id=\(265\)](http://www.iem.net/products?id=(265)). (参照日 : 2020 年 2 月 25 日)
- 29) Wayside Inspection Devices Inc., TBOGI : http://www.wid.ca/sites/default/files/brochures/TBOGI/WID_TBOGI_Brochure_US.pdf. (参照日 : 2020 年 2 月 25 日)
- 30) Schlake, B. W., Todorovic, S., Edwards, J. R., Hart, J. M., Ahuja, N. and Barkan, C. P. L. : Machine vision condition monitoring of heavy-axle load railcar structural underframe components, Proceedings Institution Mechanical Engineers, Part F: J Rail and Rapid Transit, Vol.224, No.5, pp.499-511, 2010, DOI: 10.1243/09544097JRR376.
- 31) Anish Poudel, Matthew Witte : Tycho ACWDS Detection Performance Summary, Technology Digest, TD-17-003, pp.1-4, 2017.
- 32) Matthew Witte, Richard Chaparro : Fully Automated Train Scan: Automatic Truck Component Scanning System Evaluation, Technology Digest, TD-15-025, pp.1-4, 2015.
- 33) Alex Latchaw, Scott Gage : Listening out for trouble, Railway Gazette International, August, pp.67-68, 2016.
- 34) 城取岳夫, 深澤香敏 : 軸はりゴムのための定置型状態監視手法の基礎試験, 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL-2018), SS2-7, U00111, 2018
- 35) 堤亮輔, 城取岳夫 : 高速度カメラを用いた振動解析による排障器の取付状態識別手法の検討, 第 26 回鉄道技術シンポジウム (J-RAIL2019), S2-3-5, pp. 77-79, 2019
- 36) 総務省 : 平成 26 年版 情報通信白書, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc141210.html> (参照日 : 2020 年 2 月 25 日)